

# 자화된 페라이트상의 마이크로스트립 공진기와 결합 선로의 전파특성

정회원 박기동\*

## Wave Propagation Characteristics of Microstrip Resonator and Coupled Microstrip Lines on Magnetized Ferrite

Ki-dong Park\* *Regular Member*

요약

본 논문에서는 시간영역 유한차분법(FDTD)를 이용하여 페라이트-유전체 구조를 갖는 마이크로스트립 공진기와 마이크로스트립 결합 선로에 대한 전자파 전파특성을 해석한다. 이를 위해 수정된 GT-PML을 페라이트의 최외각 경계면에 적용한다. 마이크로스트립 결합선로에서는 자기 바이어스 인가 방향에 따른 산란 파라미터를 계산하고, 마이크로스트립 공진기에서는 자기 바이어스 값 변화시키면서 공진 특성을 해석한다. 마이크로스트립 공진기의 공진 주파수에 대해 2차원 FDTD와 3차원 FDTD의 해석 결과를 비교하여 MSW 소자의 전기적인 동조성을 확인한다.

**Key Words** : ferrite, MSW, microstrip resonator, coupled microstrip lines, FDTD

ABSTRACT

In this paper, wave propagation characteristics of microstrip resonator and coupled microstrip lines are analyzed using finite-difference time-domain method. The substrate layers consist of a magnetized ferrite substrate and a dielectric substrate. The modified generalized theory of perfectly matched layer is applied at the most outer boundary of ferrite to seek credible analysis. In a microstrip coupled line, which is magnetized in transverse or longitudinal direction to the direction of wave propagation, scattering parameters are calculated. For a microstrip resonator, resonance characteristics as a function of magnetic bias field are analyzed. A comparison of the two-dimensional FDTD results and the three-dimensional FDTD results on resonance frequency is accomplished. The electrical tune of MSW devices is verified by these results.

### I. 서론

통신용 부품 가운데 필터는 핵심적인 수동소자로서 VHF 및 UHF 대역에서는 SAW(Surface Acoustic Wave) 필터가 주종을 이루고 있다. SAW 필터는 압전 특성을 갖는 기판상에 사진식각 기법으로 형성시킨 IDT(Interdigital Transducer)를 이용해 전자기 에너지와 SAW 에너지 사이의 상호변환을 이루어 냄으로써

필요한 동작 주파수 특성을 얻을 수 있게 한 것이다. 이 경우 일반적으로 SAW의 파장은 대략 전자파의 파장보다  $10^{-5}$ 배 정도 짧다<sup>[1]</sup>. 따라서 동작 주파수가 밀리미터파 대역으로 높아지면 SAW의 파장은 매우 짧아지게 되고 전파 손실이 증가하게 되어 SAW 필터는 제작이 불가능하다.

이에 대한 대안으로 마이크로파 및 밀리미터파 대역에서는 MSW(Magnetostatic Wave)를 이용하여 필

\* 동강대학 정보통신과(keedong0@nate.com)

논문번호 : 10028-0428, 접수일자 : 2010년 4월 28일



의 2차 정확도  $[(\Delta t)^2]$ 를 보장하기 위해서는 주의가 요구된다. 즉 시간과 공간에서 FDTD 알고리즘의 적절한 동기화가 이루어져야 한다.

임의 방향으로 기하학적 구조가 균일할 때는 2차원 문제로 간주할 수 있다. 예로 y 방향으로 기하학적 구조가 균일할 때는 그림 1의 3차원 단위 격자를 x-z 평면에 투영시킨 그림 2의 2차원 단위 격자로부터 해석에 필요한 유한 차분 방정식을 얻는다.

2차원 문제로 간략화 되므로 계산영역 내의 모든 계 성분은 다음 식(6)의 형태로 가정한다.

$$\vec{F}(x, y, z, t) = \vec{f}(x, z, t)e^{-j\beta y} \quad (6)$$

여기서 y는 전파 방향,  $\beta$ 는 모드별 위상정수,  $\vec{F}$  와  $\vec{f}$ 는 임의의 계 성분을 나타낸다. 식(6)를 식 (1), (2)에 대입하여 다음 식(7), (8)을 얻는다.

$$\frac{\partial \vec{e}}{\partial t} = -\frac{1}{\epsilon} (j\beta \hat{y} \times \vec{h} - \nabla_{x,z} \times \vec{h}) \quad (7)$$

$$\frac{\partial \vec{h}}{\partial t} = \frac{1}{\mu_0} (j\beta \hat{y} \times \vec{e} - \nabla_{x,z} \times \vec{e}) - \frac{\partial \vec{m}}{\partial t} \quad (8)$$

여기서 j는 허수를 의미한다. 편미분 방정식인 식 (7), (8)에 관련된 유한 차분 방정식도 중심 차분 근사를 사용하여 쉽게 구할 수 있다. 이러한 유한 차분 방정식과 식(4), (5)를 2차원에서 표현하여 함께 사용함으로써 FDTD 알고리즘을 구성한다<sup>5)</sup>.

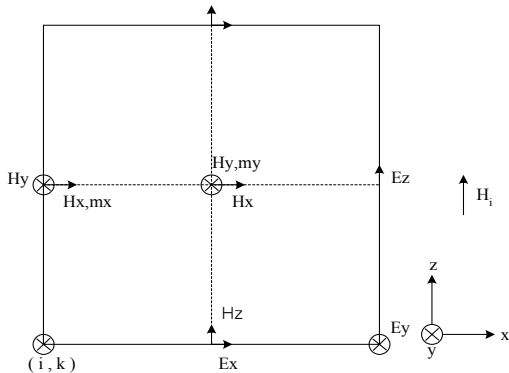
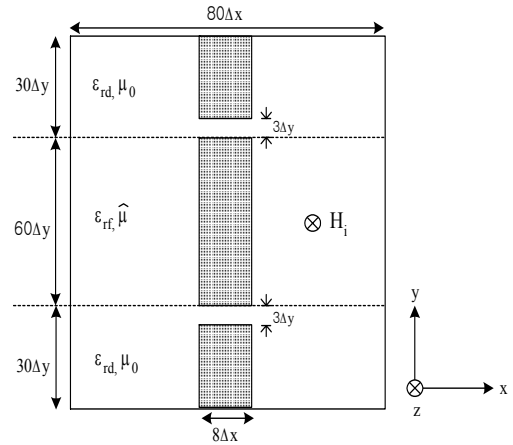


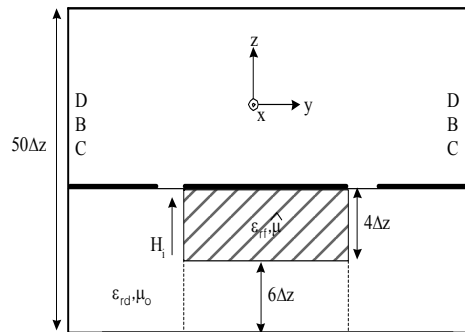
그림 2. 간략화된 2차원 단위 격자  
Fig. 2. Reduced two dimensional mesh

### III. 해석 결과 및 검토

그림 3은 전자파 진행방향에 수직으로 자화된 페라이트-유전체 구조를 갖는 마이크로스트립 공진기를



(a) top view



(b) side view

그림 3. 전자파 진행방향에 수직으로 자화된 페라이트-유전체 구조를 갖는 마이크로스트립 공진기.  
Fig. 3. Microstrip resonator with transverse magnetized ferrite-dielectric structure.

나타낸다. 페라이트는 포화 자화  $4\pi M_s = 1750[G]$ , DC 자계  $H_1 = 1000[Oe]$ , 제동 상수  $\alpha = 0.0$ 으로 가정한다. 해석 파라미터는 단위격자 크기  $\Delta x = \Delta z = 50[\mu m]$ ,  $\Delta y = 25[\mu m]$ , 안정 계수  $s = 0.9$ , 가우시안 펄스의 반치 폭  $T = 80\Delta t$ , 시간 지연  $t_0 = 3T$ ,  $\epsilon_{rf} = \epsilon_{rd} = 15.3$ 으로 설정한다. 반복 시간스텝  $n = 35000$ 이고 주파수 영역 응답을 얻기 위해 역시 DFT를 수행하고, 이 때 주파수 해상도는  $50[MHz]$ 이다.

그림 4는 그림 3에서 페라이트 영역이 유전체로 대체될 때, 즉 유전체로만 구성된 기판상의 마이크로스트립 공진기에 대한 공진 특성으로, 공진 주파수  $f_0 = 7.25[GHz]$ 이다. 공진을 일으키는 부분의 길이는  $60\Delta y = 1.5[mm]$ 로 공진주파수  $f_0$ 에 대응하는 공진 파장  $\lambda_0$ 의 1/4에 해당한다. 그림 4는 추후에 자화된 페라이트가 공진 특성에 미치는 영향을 파악하기 위한

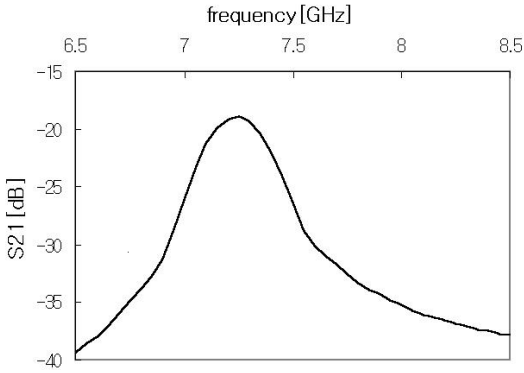


그림 4. 유전체로만 구성된 기판상의 마이크로스트립 공진기에 대한 공진 특성.  
Fig. 4. Resonance characteristics of microstrip resonator on dielectric substrate( $f_0=7.25$ [GHz]).

비교자료로써 제시된 것이다.

그림 5는 공진 주파수  $f_0$ 를 예측하기 위해 공진파장  $6[\text{mm}]=\pi/\beta_0$ 가 되는  $\beta_0$ 를 선택한 후, 2차원 FDTD로 인가 자계의 세기를 변화시키면서 고정된 위상 정수  $\beta_0$ 에 대한 공진기의 분산 곡선을 구하여 도시한 것이다.

그림 5로부터 인가 자계의 세기가 1500[Oe] 미만일 때 공진기는 단일 공진 주파수를 갖지만, 1500-2500[Oe]의 인가 자계 범위에서는 이중 공진 주파수를 갖게 됨을 알 수 있다. 이런 사실을 그림 6에서도 확인할 수 있다. 그림 5의  $f_1, f_2$ 는 MSVW의 상하한 주파수로 식(9)로 표현된다<sup>6)</sup>.

$$f_1 = \frac{\sqrt{\mu_0} H_i}{2\pi} \leq f \leq f_2 = \frac{\sqrt{\mu_0} \sqrt{H_i(H_i + M_s)}}{2\pi} \quad (9)$$

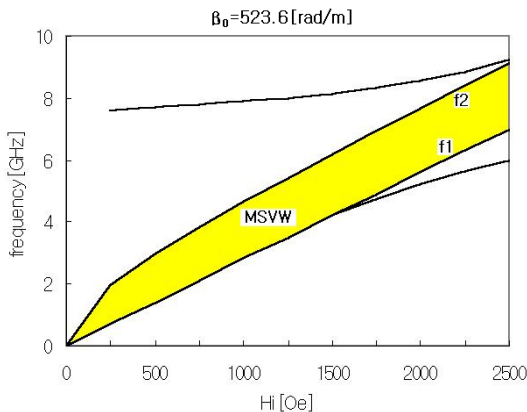
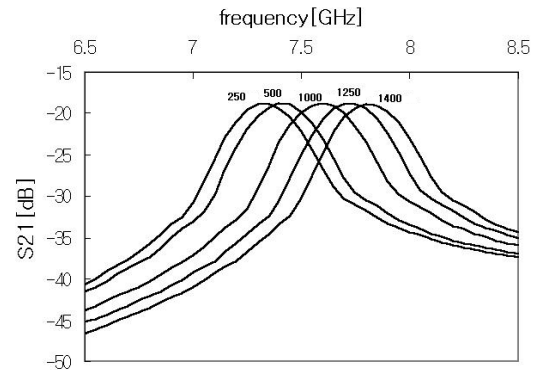


그림 5. 고정된 위상 정수  $\beta_0=\pi/6[\text{mm}^{-1}]$ 에 대한 인가 자계의 세기 변화에 따른 분산 곡선.  
Fig. 5. Magnetic-field dependance of dispersion curve for fixed propagation constant  $\beta_0=\pi/6[\text{mm}^{-1}]$ .

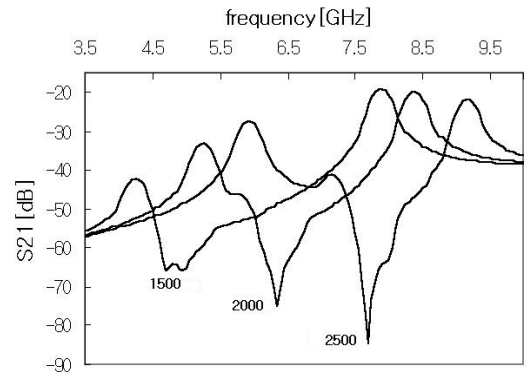
여기서  $\gamma$ 는 스핀 각운동량과 스핀 자기 모멘트와의 비로 회전 자기율이며, 그 값은  $1.76 \times 10^{11} [\text{Hz/T}]$ 이다.

그림 6은 고려중인 공진기에 대해 인가 자계의 변화 범위를 1500[Oe] 미만(250-1400[Oe])과 1500-2500[Oe]로 각각 구별하여 3차원 FDTD 구한 삽입 손실  $S_{21}$ 를 나타낸다. 그림 4에 주어진 공진 특성과 비교하면, 인가 자계의 세기가 1500[Oe] 미만인 경우는 공진 주파수에서 삽입 손실의 크기가 거의 동일한 값을 유지하면서 DC 자계 250-1400[Oe]에 대응하여 공진 주파수가 7.35-7.81[GHz] 범위에서 천이되어 460 [MHz]의 동조범위를 갖으며, 1500-2500[Oe]의 인가 자계 범위에서는 공진 특성이 감소하고 마이크로스트립 선로의 전파 방향에 직각으로 방사되는 MSFVW 모드에 기인한 차단 대역을 살펴볼 수 있다.

따라서 1500[Oe] 미만의 인가 자계에 대해서는 공진 주파수보다 훨씬 낮은 주파수에서 MSFVW 대역이 존재하므로 유전체로만 구성된 기판상의 마이크로



(a) 250-1400[Oe]



(b) 1500-2500[Oe]

그림 6. 인가 자계의 세기 변화에 대한 마이크로스트립 공진기의 삽입 손실.  
Fig. 6. Insertion losses of microstrip resonator versus bias magnetic field.

스트립 공진기와 같이 주로 마이크로스트립 전파 모드(MS 모드)에 의해서 공진 특성이 결정되지만, 1500-2500[Oe]의 인가 자계에 대해서는 공진 주파수 부근에서 MSFVW 대역이 존재하므로 MS 모드와 MSFVW 모드가 혼재되고 이러한 MSFVW 모드의 발생으로 인해 공진 특성이 감소된다고 할 수 있을 것이다. 결국 고려중인 공진기의 전기적인 동조범위는 MSFVW 모드의 발생에 의해 제한된다.

표 1은 전기적인 동조범위에서 공진 주파수  $f_0$ 의 변화에 대해 2차원 FDTD에 의해 예측된 결과와 3차원 FDTD에 의해 계산한 결과를 인가 자계의 세기에 따라 비교한 것이다.

3차원 FDTD의 결과가 2차원 FDTD의 결과에 비해 낮게 계산된다. 2차원 해석의 경우에는 물리적인 길이 6[mm]를 그대로 사용해서 선택한 전파 상수  $\beta_0$ 에 대해 계산하는 반면, 3차원 해석할 때는 공진기의 양쪽 끝단이 개방단이므로, 여기에서 나타나는 전자파의 가장자리 효과(fringing effect)에 의해 공진기의 길이가 물리적인 길이보다 미소하게 약간 더 길어지기 때문이다.

그림 7은 페라이트-유전체 구조를 갖는 마이크로스트립 결합 선로를 나타낸다. 페라이트의 포화 자화, 제동 상수 및 해석 파라미터는 마이크로스트립 공진기의 경우와 동일하다. 반복 시간 스텝  $n=30000$ 으로 얻어진 시간 영역 응답을 주파수 해상도 50[MHz]로 DFT하여 주파수 영역 응답을 구한다.

그림 8은 DC 자기 바이어스 계를 z 방향으로 인가할 때의 산란 파라미터를 도시한 것이다. 결합은 MSFVW 대역의 하한 주파수 부근에서 나타남을 살펴볼 수 있다. 결합이 일어나는 주파수 부근에서 반사 손실을 나타내는 산란 파라미터  $S_{11}$ 이 큰 이유는 임피던스 부정합에 기인한다.

포트 3으로의 결합보다 포트 4로 결합이 크게 나타

표 1. 인가 자계의 세기 변화에 따른 공진 주파수  $f_0$ 의 비교  
Table 1. Comparison of resonance frequency versus bias magnetic field.

| Hi[Oe] | 2D-FDTD[MHz] | 3D-FDTD[MHz] |
|--------|--------------|--------------|
| 250    | 7.63         | 7.35         |
| 500    | 7.70         | 7.40         |
| 750    | 7.78         | -            |
| 1000   | 7.88         | 7.60         |
| 1250   | 7.99         | 7.72         |
| 1400   | 8.08         | 7.81         |

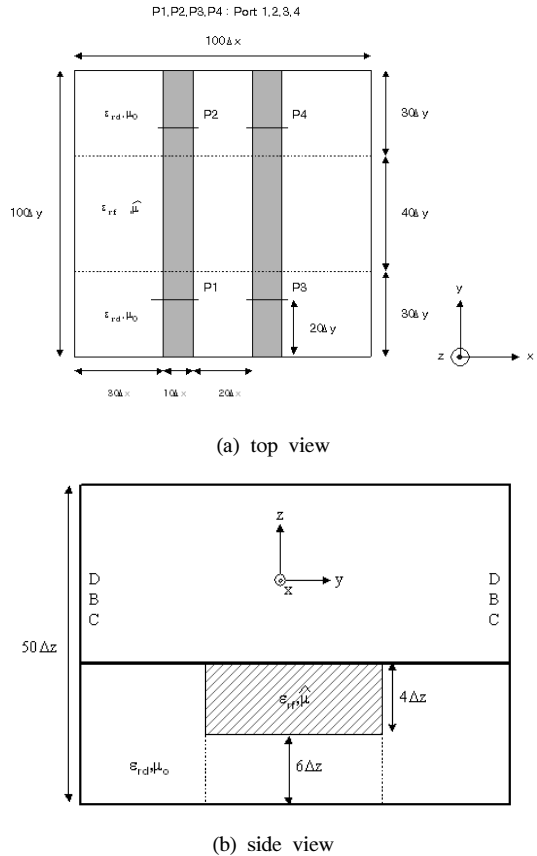


그림 7. 페라이트-유전체 구조를 갖는 마이크로스트립 결합 선로.  
Fig. 7. Microstrip coupled line with ferrite-dielectric structure.

나는데, 이는 자화된 페라이트의 물리적인 특성으로 설명될 수 있다. 인가된 DC 자기 바이어스 계는 자기 쌍극자를 바이어스 계의 방향으로 정렬시켜 자유 세차운동을 일으킨다. 이 세차운동의 방향은 우회전 원편파 파동에 대한 강제 세차운동과 일치하고 좌회전 원편파 파동에서는 반대이다<sup>[7]</sup>.

그림 9는 DC 자기 바이어스 계를 y 방향으로 인가할 때의 산란 파라미터를 도시한 것이다. 앞의 경우와 마찬가지로 결합 주파수는 MSSW 대역의 하한 주파수 부근이지만 포트 3와 포트 4로의 결합은 거의 동일하게 나타남을 확인할 수 있다.

그림 8, 9로부터 인가하는 DC 자기 바이어스 계의 방향 변화에 따라 MSW 대역 또한 다르게 결정되므로 이에 대응하여 결합 주파수가 천이함을 살펴볼 수 있다. 따라서 이러한 해석 결과는 전기적으로 동조가 가능한 결합기를 설계하는데 기초적인 자료로 활용될 수 있다.

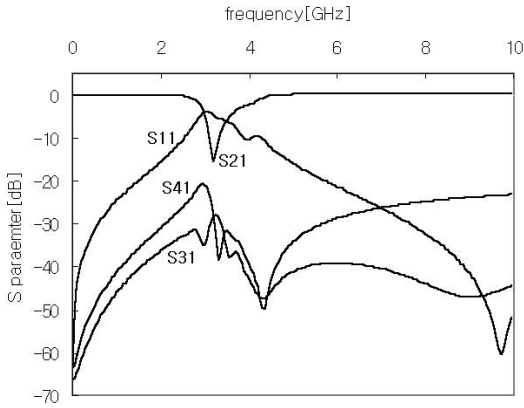


그림 8. DC 자기 바이어스 계를 z 방향으로 인가할 때 산란 파라미터.  
 Fig. 8. Scattering parameter of microstrip coupled line with bias magnetic field applied in z-direction.

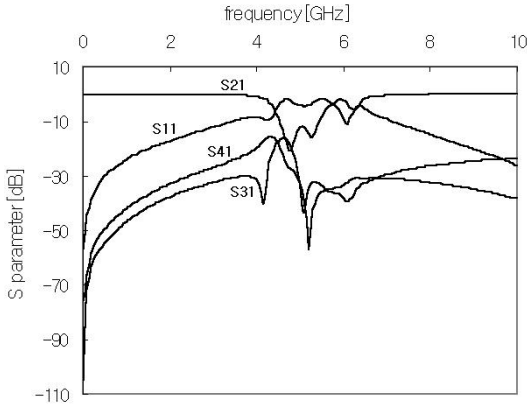


그림 9. DC 자기 바이어스 계를 y 방향으로 인가할 때 산란 파라미터.  
 Fig. 9. Scattering parameter of microstrip coupled line with bias magnetic field applied in y-direction.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 FDTD를 사용하여 페라이트-유전체 구조를 갖는 마이크로스트립 공진기 및 마이크로스트립 결합 선로의 전자파 전파 특성을 해석하였다. 이때 페라이트의 최외각 경계면에서 나타나는 반사를 최소화하기 위해 수정된 GT-PML을 사용하였다.

전자파 진행방향에 수직으로 자화된 페라이트-유전체 구조를 갖는 마이크로스트립 공진기의 경우, 인가 DC 자계의 세기 250-1400[Oe]에 대응하여 공진 주파수가 7.35-7.81[GHz] 범위에서 천이되어 460[MHz]의 동조범위를 갖지만, 1500-2500[Oe]의 인가 DC 자계 범위에서는 MS 모드와 MSFVW 모드가 공진 주파수 부근에서 혼재되어 나타나게 되고 MSFVW 모드의

발생으로 인해 공진 특성이 감소된다. 결국 MSFVW 모드의 발생이 공진기의 전기적인 동조범위를 제한하는 것을 확인하였다.

마이크로스트립 공진기의 공진 주파수에 대해 2차원 FDTD와 3차원 FDTD의 해석 결과를 함께 제시하여 비교하였다.

페라이트-유전체 구조를 갖는 마이크로스트립 결합 선로는 전자파 진행방향에 대해 DC 자기 바이어스 계가 인가되는 방향의 변화에 따라 MSW 대역 또한 다르게 결정되어 결합 주파수가 천이되어 나타남을 확인하였다. 이 해석 결과는 전기적으로 동조가능한 결합기를 설계하는데 기초적인 자료로 활용될 수 있을 것이다.

두 가지 형태의 MSW 소자로부터, SAW를 이용하는 소자와 비교할 때 MSW 소자의 유일한 유용성인 전기적인 동조성을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] M. Hikita, Y. Ishida, T. Tabuchi and K. Kurosawa, "Miniature SAW antenna duplexer for 800-MHz portable telephone used in cellular radio systems," *IEEE Microwave Theory Tech.*, Vol.36, pp.1047-1056, Jun. 1988.
- [2] 박기동, "자화된 페라이트상의 마이크로스트립 선로에 의한 표면 정자파 여기특성 해석," *한국통신학회*, Vol.31, No.2T, pp.59-65, Feb. 2006.
- [3] M. Okoniewski and E. Okoniewska, "FDTD analysis of magnetized ferrites: a more efficient algorithm," *IEEE Microwave and Guided wave Letters.*, Vol.4, pp.169-171, Jun. 1994.
- [4] D. D. Stancil, *Theory of Magnetostatic Waves*, Berlin: Springer-Verlag, 1993.
- [5] J. A. Pereda, L. A. Vielva, A. Vega, and A. Prieto, "FDTD analysis of magnetized ferrites: application to the calculation of dispersion characteristics of ferrite-loaded waveguides," *IEEE Microwave Theory Tech.*, Vol.43, pp. 350-357, Feb. 1995.
- [6] P. kabos and V. S. Stalmachov, *Magnetostatic Waves and Their Application*, New York: Champan & Hall, 1994.
- [7] R. S. Elliott, *An Introduction to GUIDED WAVES and MICROWAVE CIRCUITS*, Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.

박 기 동 (Ki-dong Park)

정회원



1995년 2월 전남대학교 전자공  
학과 석사

2000년 8월 전남대학교 전자공  
학과 박사

1997년 3월~현재 동강대학 정  
보통신과 부교수

<관심분야> 전자파 수치해석, 안테나 설계